

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Struktur Rangka

Struktur jembatan rangka merupakan gabungan lebih dari satu rangka batang bidang yang terhubung oleh balok melintang (Krauge, Merriam, 1987). Struktur ini terdiri dari gabungan batang struktural yang membentuk segitiga tegar yang saling terhubung. Batang struktural tersebut akan saling terhubung satu sama lain dengan menggunakan pengelasan, sambungan keling, baut atau jepik putar besar. Material yang biasa digunakan sebagai struktur jembatan rangka adalah baja dan kayu. Baja dan kayu memiliki kelebihan mudah dalam pengerjaan suatu sistem rangka.

Struktur jembatan rangka memiliki berbagai macam jenis konfigurasi. Konfigurasi yang sering digunakan adalah tipe Pratt, Howe, Warren, K, dan Baltimore (gambar 2.1). Berbagai macam konfigurasi tersebut memiliki satu kesamaan yaitu semua berasal dari satu struktur rangka sederhana yaitu segitiga.

2.1.1. Rangka Batang Bidang

Rangka batang merupakan susunan dari batang – batang yang tersambung pada setiap ujungnya untuk membentuk struktur yang stabil dan tegar (Krauge, Merriam, 1987). Elemen utama pada rangka batang adalah segitiga. Rangka ini terbentuk oleh tiga batang yang terhubung jadi satu sehingga membentuk kerangka struktur yang tegar. Selain itu terdapat juga struktur yang membentuk suatu poligon karena terdiri dari empat atau lebih batang yang terhubung. Struktur ini akan menghasilkan deformasi masif dan tidak tegar atau tidak stabil. Hal ini terjadi karena

2.1.2. Gaya Batang

Gaya batang pada struktur rangka didasari oleh prinsip kesetimbangan. Terdapat dua asumsi analisa gaya batang. Pertama, bahwa semua batang adalah batang dua gaya. Hal ini mengartikan bahwa batang

tersebut akan berada pada kesetimbangan dibawah aksi dua gaya saja. Sehingga pada batang dua gaya akan hanya terdapat dua aksi gaya yang linear, sejajar, berlawanan arah dan sama besar dalam kondisi tekan maupun tarik. Gaya ini akan bekerja pada ujung batang tersebut (Krauge, Merriam, 1987). Kedua, asumsi dalam analisa rangka batang sederhana bahwa semua gaya luar dikenakan pada sambungan atau titik temu garis batang. Hal ini dikarenakan pada struktur rangka jembatan akan terdapat titik yang menerima lebih dari dua garis gaya. Untuk mencapai konsep kesetimbangan garis gaya tersebut haruslah *konkuren*. Hal ini dikarenakan pada prinsip kesetimbangan rangka batang nilai $\sum \text{Momen} = 0$. Perbedaan titik konkurensi akan mengakibatkan suatu momen resultan terhadap titik konkurensi dua gaya (Krauge, Merriam, 1987).

2.2.Cold-Formed Steel (Baja Canai Dingin)

Canai dingin mulai dikenalkan dan dikembangkan sebagai struktur utama suatu bangunan seperti balok dan kolom. Penggunaan baja canai dingin pada struktur jembatan saat ini telah dikenalkan kepada kalangan akademis melalui ajang perlombaan jembatan Indonesia atau KJI. Berbagai penelitian serta pengembangan dilakukan untuk mendapatkan manfaat baja canai dingin secara maksimal. Sehingga hal ini menghasilkan rumusan *ethic codes* yaitu SNI 7971 : 2013 tentang Struktur baja canai dingin sebagai acuan kerja konstruksi baja canai dingin pada prakteknya.

2.2.1. Sifat Mekanis Baja Canai Dingin

Penggunaan material baja canai dingin harus memenuhi kriteria tegangan desain yang telah ditetapkan. Dalam SNI 7971 : 2013 tentang struktur baja canai dingin telah diatur bahwa batasan tegangan leleh minimum (F_y) dan kekuatan tarik minimum (F_u) tidak boleh melebihi nilai yang telah disyaratkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tegangan Leleh Minimum (F_y) dan Kuat Tarik Minimum (F_u)
Baja Canai Dingin

Standard yang digunakan	Mutu Baja	Tegangan Leleh (F_y) MPa	Kuat Tarik (F_u) MPa
AS 1397	G250	250	320
	G300	300	340
	G350	350	420
	G450*	450	480
	G500**	500	520
	G550**	550	550

Sumber : SNI 7971 : 2013 tentang struktur baja canai dingin

- * : berlaku untuk material gelas keras dengan ketebalan lebih besar atau sama dengan 1,5 mm
- ** : berlaku untuk material gelas keras dengan ketebalan lebih besar 1,0 mm tetapi kurang dari 1,5 mm
- *** : berlaku untuk material gelas keras dengan ketebalan lebih kecil atau sama dengan 1,0 mm

Selain itu beberapa nilai mekanis baja canai dingin lainnya adalah sebagai berikut (Hendra, 2017) :

Modulus Elastisitas bahan (E) : 200.000 MPa

Modullus Geser (G) : 80.000 Mpa

Koefisien Pemuaian (α) : 12×10^{-6} per $^{\circ}\text{C}$

Angka Poisson (ν) : 0,3

2.3.Kayu

Penggunaan material kayu pada struktur komposit menjadi pilihan dalam dunia konstruksi. Berbagai macam peneletian mengenai komposit kayu dengan bahan material lain telah dikembangkan. Awaludin,dkk (2015), telah meneliti pengaruh material kayu sebagai bahan komposit baja canai dingin. Penelitian ini menunjukkan bahwa kelemahan canai dingin perihail tekuk (*buckling*) dapat teratasi dengan adanya komposit kayu. Kayu juga sering digunakan paa konstruksi beton bertulang sebagai pengganti baja tulangan. Veronica telah melakukan penelitian tentang pengaruh tulangan kayu

pondah pada struktur beton bertulang. Sehingga penggunaan kayu pada struktur komposit menjadi pilihan penting karena manfaat dan keunggulannya.

2.3.1. Sifat Mekanika Kayu

Dalam penggunaannya pada konstruksi bangunan kayu memiliki syarat khusus yang telah diatur oleh SNI. Peraturan tersebut dikenal sebagai SNI – 7973 – 2013 tentang spesifikasi desain untuk konstruksi kayu. Pada peraturan tersebut batasan – batasan kekuatan kayu dan modulus elastisitas kayu untuk setiap mutu kayu telah diatur seperti pada tabel 2.2. berikut ini,

Tabel 2.2. Nilai Desain dan Modulus Elastisitas Acuan

Kode Mutu	Nilai Desain Acuan (Mpa)					Modulus Elastisitas Acuan (MPa)	
	F _b	F _t	F _c	F _v	F _{cl}	E	E _{minimum}
E25	26,0	22,9	22,9	3,06	6,11	25000	12500
E24	24,4	21,5	21,5	2,87	5,47	24000	12000
E23	23,2	20,5	20,5	2,73	5,46	23000	11500
E22	22,0	19,4	19,4	2,59	5,19	22000	11000
E21	21,3	18,8	18,8	2,50	5,00	21000	10500
E20	19,7	17,4	17,4	2,31	4,63	20000	10000
E19	18,5	16,3	16,3	2,18	4,35	19000	9500
E18	17,3	15,3	15,3	2,04	4,07	18000	9000
E17	16,5	14,6	14,6	1,94	3,89	17000	8500
E16	15,0	13,2	13,2	1,76	3,52	16000	8000
E15	13,8	12,2	12,2	1,62	3,24	15000	7500
E14	12,6	11,1	11,1	1,48	2,96	14000	7000
E13	11,8	10,4	10,4	1,39	2,78	13000	6500
E12	10,6	9,4	9,4	1,25	2,50	12000	6000
E11	9,1	8,0	8,0	1,06	2,13	11000	5500
E10	7,9	6,9	6,9	0,93	1,85	10000	5000
E9	7,1	6,3	6,3	0,83	1,67	9000	4500

E8	5,5	4,9	4,9	0,65	1,30	8000	4000
E7	4,3	3,8	3,8	0,51	1,02	7000	3500
E6	3,1	2,8	2,8	0,37	0,74	6000	3000
E5	2,0	1,7	1,7	0,23	0,46	5000	2500

Sumber : SNI – 7973 – 2013 tentang spesifikasi desain untuk konstruksi kayu

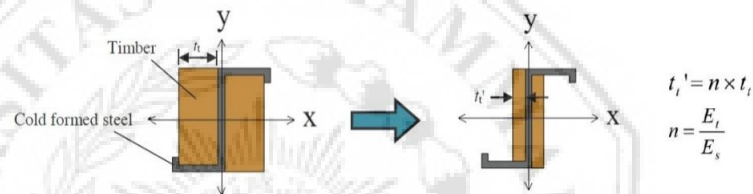
2.4. Material Komposit

Struktur Komposit merupakan struktur yang terdiri dari gabungan dua atau lebih berbeda material yang dimanfaatkan keunggulan mekanis dan fisiknya dalam menahan beban suatu struktur menjadi satu kesatuan material (Tomas, Zhao, 2012). Setiap material memiliki keunggulan dan kemampuan dalam merespon kinerja struktur. Struktur komposit dalam penerapannya akan mengasumsikan bahwa setiap material yang tersusun akan bekerja sama untuk memikul kinerja struktur tersebut (Pujianto). Sehingga kapasitas dukung dari struktur komposit adalah merupakan kapasitas gabungan antar dua material.

Material komposit baja canai dingin dengan kayu telah dilakukan penelitian. Ali Awaluddin,dkk menunjukkan bahwa terdapat peningkatan kekuatan menahan tekuk (*buckling*) pada struktur rangka baja canai dingin komposit dengan pengisi kayu. Hal ini terjadi karena kekuatan baja canai dingin yang terbatas oleh rasio lebar terhadap ketebalannya yang menyebabkan tekuk telah diatasi oleh penambahan kayu yang akan menahan kendala tersebut. Sedangkan Irawati,dkk telah mengembangkan penelitian tersebut pada analisa bentang panjang rangka atap yaitu 25 m dengan penggunaan komposit kayu pada batang tekan. Hasil penelitian tersebut telah menghasilkan kekuatan struktur rangka bentang panjang yang dihasilkan oleh komposit kayu tersebut. Ditambahkan lagi oleh Irawati bahwa bentang panjang ini akan tetap stabil jika diperpanjang.

2.4.1. Transformed Section

Transformed Section merupakan metode transformasi penampang yang memodifikasi luasan penampang ekuivalen menjadi material yang homogen dengan menggunakan modular rasio (n) (Tomas, Zhao, 2012). Modular rasio (n) merupakan rasio perbandingan Modulus elastisitas bahan antara dua material yang berbeda pada struktur komposit. Metode ini dilakukan untuk memudahkan proses perhitungan tegangan dan atau defleksi suatu struktur yang disebabkan oleh *service loads*. Al Awaludin,dkk menunjukkan transformed-section pada kasus material komposit baja canai dingin dengan kayu seperti pada gambar 2.1.



(Gambar 2.1. Transformed-Section Cold-Formed Steel-Timber Lamina)

2.5. Analisa Penampang Batang Tekan

Analisa struktur yang akan dilakukan sesuai dengan *standard etic code* yang telah dimuat pada SNI 791-2013 tentang struktur canai dingin. Selain itu mengkombinasikan dengan teori teori yang relevan dengan tgas akhir ini. Struktur komposit kayu ini akan ditransformasikan menjadi satu material baja canai dingin.

2.5.1. Radius Of Gyration

Radius Of Gyration akan dilakukan perhitungan secara manual dengan rumus eq. 4.1. Hal ini bertujuan untuk menganalisa perbedaan nilai *Radius Of Gyration* antara penampang non-komposit dengan penampang komposit. Sehingga hasil perhitungan ini akan berpengaruh kepada rasio kelangsingan batang struktur tersebut yang akan dianalisa setelahnya.

$$r = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \dots\dots\dots \text{Eq 4.1}$$

Dimana :

r : Radius Of Gyration

I : Inersia Penampang minimum

A : Sectional Area

Hal ini akan berbeda untuk penampang komposit. Penampang komposit akan menggunakan *ratio modulus* (n) sebagai alternatif penghubung bahan pada dua material yang berbeda. *Ratio modulus* (n) merupakan rasio modulus elastisitas bahan yang dalam hal ini antara baja canai dingin dan kayu/*timber*. Berdasarkan James, Gere pada buku *Mechanis Of Material* persamaan yang digunakan seperti disajikan pada eq. 4.2. *Ratio modulus* (n) ini akan selanjutnya sebagai pengali dalam menentukan inersia bahan dari penampang komposit (eq.4.3).

$$n = \frac{E_t}{E_s} \dots\dots\dots \text{eq. 4.2.}$$

$$I_{comp} = I_s + n.I_t \dots\dots\dots \text{eq. 4.3.}$$

$$A_{comp} = A_{steel} + n.A_{kayu} \dots\dots\dots \text{eq. 4.4.}$$

Dimana,

n : *rasio modulus*

E_t : Modulus Elastisitas *Timber*/kayu (6130,73 MPa)

E_s : Modulus Elastisitas *Steel*/Baja (200.000 MPa)

$$n = \frac{6130,73}{200000} = 0,031$$

I_t : Inersia *Timber*/kayu

I_s : Inersia *Steel*/Baja

A_{comp} : Luas Penampang (*cross sectional area*) penampang transformasi

A_{steel} : Luas Penampang Baja Canai Dingin

A_{kayu} : Luas penampang kayu

2.5.2. Slenderness Ratio (Rasio Kelangsingan Penampang)

Kelangsingan batang tekan menjadi penting dalam analisa struktur batang tekan. Hal ini akan berfungsi untuk mengetahui kestabilan batang dalam menahan kinerja struktur. Berikut analisa pengaruh penampang komposit pada batang tekan ini terhadap kelangsingan batang tekan. Berdasarkan SNI 7971:2013 perhitungan rasio kelangsingan akan menggunakan persamaan yang disajikan pada eq. 4.4. batasan yang diberikan adalah nilai $\lambda < 200$.

$$\lambda = \frac{K_e L}{r} \dots \dots \dots \text{eq. 4.4.}$$

Dimana :

λ : Rasio Kelangsingan

K_e : Faktor panjang efektif komponen struktur tekan (sendi : 1)

L : Panjang efektif struktur tekan

r : *radius of gyration*

2.5.3. Tegangan Kritis Batang Tekan

Tegangan kritis merupakan batasan kekuatan yang dimiliki setiap material ataupun penampang struktur. Struktur akan mengalami kondisi dimana akan terjadi keruntuhan yaitu pada kondisi tegangan kritis. Baja canai dingin memiliki 2 mode keruntuhan yang akan terjadi yaitu keruntuhan bahan yang diakibatkan oleh batasan leleh baja canai dingin (F_y) serta keruntuhan tekuk (*buckling mode*) yaitu pada tegangan kritis. SNI:7971:2013 tentang baja canai dingin mensyaratkan analisa terhadap 2 kondisi tersebut.

2.5.3.1. Tegangan Tekuk Plat

Tegangan tekuk plat merupakan analisa terhadap tekuk yang akan terjadi pada plat penampang. Analisa akan dilakukan pada setiap tegangan kritis badan (webs), sayap (flens) serta lips (sayap pengaku). Persamaan yang digunakan pada SNI 7971 : 2013 tentang baja canai dingin berikut.

$$F_{cr(flens)} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_f} \right)^2$$

$$F_{cr(web)} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2$$

$$F_{cr(lips)} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left(\frac{t_f}{lw} \right)^2$$

Dimana,

F_{cr} : tegangan kritis plat

K : koefisien tekuk plat : 4

π : 3,14

E : Modulus Elastisitas Young (200.000 MPa)

ν : angka poison : 3

2.5.3.2. Kapasitas Tegangan Kritis Komponen Struktur (F_n)

Tegangan kritis penampang komponen merupakan tinjauan tegangan kritis yang akan terjadi pada sebuah struktur. Tinjauan ini akan mempertimbangkan 2 kondisi tekuk yang akan terjadi yaitu tekuk elastis, tekuk torsi atau tekuk lentur-torsi. Nilai dari F_n akan ditentukan seperti pada eq. 4.8. Berdasarkan SNI 7971 : 2013 nilai F_{oc} (tegangan tekuk) akan mengambil nilai terkecil dari dua kondisi tersebut.

a. Tegangan Tekuk Lentur Elastis

$$F_{oc} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{le}{r} \right)^2} \dots \dots \dots \text{eq.4.8}$$

Dimana,

F_{oc} : tegangan tekuk elastis

E : Elastisitas baja canai dingin (200.000 MPa)

Le : panjang batang tekuk

r : Radius Girasi

- Tegangan Tekuk torsi – lentur torsi

$$F_{oc} = \frac{1}{2\beta} \cdot [(F_{ox} + F_{oz}) - \sqrt{(F_{ox} + F_{oz})^2 - 4\beta \cdot F_{ox} \cdot F_{oz}}] \text{eq.4.9}$$

$$r_{01} = \sqrt{(rx^2 + ry^2) + (x0^2 + y0^2)} \dots \dots \dots \text{eq.4.10}$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{x0}{r_{01}} \right)^2 \dots \dots \dots \text{eq. 4.11}$$

$$F_{oz} = \frac{GJ}{A.r01} \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 EI_w}{GJ l_{ez}^2}\right) \dots \text{eq. 4.12}$$

- **Tegangan Kritis (Fn)**

Tegangan kritis (Fn) akan ditinjau dengan rumus berikut ini,

$$\lambda_c < 1,5, \text{ maka } F_n = (0,658^{\lambda_c}) F_y \dots \text{eq. 4.13}$$

$$\lambda_c > 1,5, \text{ maka } F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) F_y \dots \text{eq. 4.14}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_{oc}}} \dots \text{eq. 4.15}$$

Dimana,

λ_c : Kelangsingan non-dimensi

F_y : Tegangan Leleh Baja Canai Dingin

F_{oc} : nilai Tegangan tekuk terkecil dari 2 kondisi diatas

2.6. Analisa Penampang Batang Tarik

Batang tekan merupakan batang pada sistem struktur yang akan menerima gaya aksial tekan. Batang yang akan menerima gaya tarik rencana (N^*) harus memenuhi persamaan berikut ini, (SNI 7971 : 2013)

$$N^* \leq \phi_t N_t \dots \text{(Eq. 4.16)}$$

Dimana :

N_t : kapasitas penampang nominal dari komponen struktur dalam tarik

ϕ_t : Faktor reduksi kapasitas untuk komponen tarik (0,9 untuk komponen struktur tarik)

Untuk kapasitas penampang nominal harus diambil nilai terkecil dari dua persamaan berikut ini,

$$N_t = A_g f_y ; \text{ dan } \dots \text{(Eq. 4.17.)}$$

$$N_t = 0,85k_t A_n f_u \dots\dots\dots (Eq. 4.18.)$$

Dimana,

A_g : Luas bruto penampang

f_y : Tegangan leleh yang digunakan dalam desain

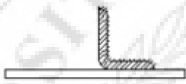
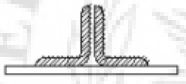
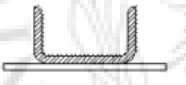
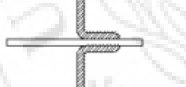
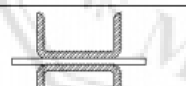
k_t : Faktor koreksi untuk distribusi gaya.

A_n : Luas netto penampang

f_u : Tegangan tarik yang digunakan dalam desain

Untuk nilai faktor koreksi untuk distribusi gaya (K_t) dapat mengambil nilai yang telah ditentukan pada tabel 2.3 sebagai berikut,

Tabel 2.3. Faktor koreksi untuk distribusi gaya (K_t)

Kasus konfigurasi	Faktor koreksi (k_t)
(i) 	0,75 untuk siku tidak sama kaki yang dihubungkan pada kaki pendeknya 0,85 untuk kasus lainnya
(ii) 	Seperti kasus (i)
(iii) 	0,85
(iv) 	1,0
(v) 	1,0

(Sumber : SNI 791-2013 tentang struktur canai dingin)

Dalam menganalisa batang tarik profil komposit menggunakan persamaan pada eq. 4.19 berikut ini. Persamaan ini berdasarkan analisa yang disajikan pada penelitian awalludin,dkk mengenai analisa penampang komposit baja canai dingin dengan pengisi kayu..

$$N_t = (A_g \times F_y) + (A_{\text{trs-kayu}} \times F_{tII}) \dots\dots\dots (Eq. 4.19.)$$

2.7. Analisa Kekuan Batang

Kekuan Batang (*stiffness*) merupakan aksi yang diperlukan untuk menghasilkan *unit displacement* (wikipedia.com) . Kekakuan batang akan dihitung melalui persamaan berikut ini.

$$K = \frac{AE}{L} \dots\dots\dots (Eq. 4.20.)$$

Dimana,

K : kekuan (*stiffness*) (N/mm)

A : Luasan Penampang (mm²)

E : Modulus Elastisitas Bahan (MPa)

L : Panjang Batang (mm)

Sedangkan untuk penampang komposit akan menggunakan persamaan berikut ini.

$$K = \frac{A_c E_c}{L} \dots\dots\dots (Eq. 4.21.)$$

Dalam menentukan nilai Elastisitas komposit akan dianalisa menggunakan persamaan eq. 4.22 yang menunjukkan bahwa terdapat pengaruh penggabungan dua material dengan mengalikan nilai elastisitas dengan porsi volume fraction pada setiap material terhadap total kompositnya (Materials Science and Engineering).

$$E_c = E_{\text{steel}} \times V_{\text{steel}} + E_{\text{kayu}} \times V_{\text{kayu}} \dots\dots\dots (Eq. 4.22.)$$

Dimana,

K : kekuan (*stiffness*) (N/mm)

Ac : Luasan penampang komposit

Ec : Modulus Elastisitas Bahan (MPa)

V_{steel/kayu} merupakan volume frictions luasan pnampang bahan.

L : Panjang Batang (mm)